

氏 名	平尾 高志 ^{ヒラオ タカシ}
所 属	理工学研究科 電気電子工学専攻
学 位 の 種 類	博士（工学）
学 位 記 番 号	理工博 第 279 号
学位授与の日付	平成 30 年 9 月 30 日
課程・論文の別	学位規則第 4 条第 1 項該当
学位論文題名	高信頼・高パワー密度電力変換器に向けた DC リンクキャパシタの回路実装に関する研究
論文審査委員	主査 准教授 和田 圭二 委員 教 授 清水 敏久 委員 准教授 五箇 繁善 委員 教 授 伊東 淳一（長岡技術科学大学）

【論文の内容の要旨】

持続可能な社会の実現に向け、電力の発電と利用の双方に対して環境負荷の低減が求められる。太陽光発電等の再生可能エネルギーや電気自動車の普及が急速に進むと予測されている。これらには、パワー半導体を用いた電力変換器がキーコンポーネントとして用いられている。太陽光発電や電気自動車の普及に伴い電力変換器の使用台数が増加するため、その高効率化、高パワー密度化、高信頼化の重要性が高まっている。これまで、電力変換器に使用するパワー半導体を、従来のシリコン(Si)から炭化ケイ素(SiC)や窒化ガリウム(GaN)といったワイドバンドギャップ半導体に置き換えることで、高効率化と高パワー密度化が進められてきた。また、SiC や GaN の特性を活かした高速スイッチングが可能になるような回路実装方式の開発も進んでいる。その一つに、パワー半導体モジュールの直近に上下アーム一対（以下、レグと呼ぶ）ごとに DC リンクキャパシタを持つレグユニットが開発されている。さらなる高パワー密度化には、電力変換器の中で大きな体積を占める DC リンクキャパシタの小形化が不可欠である。また、太陽光発電用インバータでは、故障部位の 30%がキャパシタとの報告があり、信頼性の面でもその重要性は高まっている。近年、電力変換器の DC リンクキャパシタに着目した研究事例が多数報告され、インバータのキャパシタ電流や損失の詳細な解析手法やその低減手法が提案されている。しかしながら、これらの報告では回路実装上の寄生素子の影響が十分に考慮されていない。特に、SiC や GaN 等の高速スイッチングの特性を利用してスイッチング周波数を向上した場合、寄生素子と DC リンクキャパシタの間で共振が引き起こされる恐れがある。この現象により、DC リンクキャパシタにはスイッチングに起因する電流（以下、電流リップルと呼ぶ）が増加する。

その結果、キャパシタの定格電流を超過し、電力変換器の信頼性の低下を招く。また、その対策としてキャパシタを並列接続すると、体積の増加に繋がる。

本論文では、電力変換器の高信頼、高パワー密度化を目的に、DC リンクキャパシタの電流増加現象の解明およびその抑制方法について研究する。

第 1 章は、研究背景および電力変換器の性能向上における課題、本研究の目的および論文構成について述べる。

第 2 章は、DC リンクキャパシタとその回路実装の技術動向を述べる。特に電流リプルがキャパシタの体積と信頼性に及ぼす影響について述べ、従来の電流リプル低減方法を説明する。さらに、DC リンクキャパシタの回路実装構成を比較し、レグユニット構成が、パワー半導体と DC リンクキャパシタの間の寄生インダクタンスを小さくできる点で SiC パワーデバイスを用いた高速スイッチングには優位であることを示す。

第 3 章は、レグユニットにより構成される単相フルブリッジインバータを対象に、電流リプル増加につながる共振現象の原理を明らかにする。DC リンクキャパシタと寄生インダクタンスの間を流れる共振電流の等価回路解析により、スイッチング周波数の奇数次高調波と共振周波数が近づくとキャパシタ電流が増加することを明らかにする。さらに、共振現象による電流増加を回避するために、直流側回路の回路定数を調整する設計指針を提案する。300 V, 3.7 A の単相フルブリッジインバータを設計・製作し、提案手法の妥当性を検証した。

第 4 章は、三相インバータを対象に、共振に起因するレグ間の電流アンバランスの原理を明らかにする。各レグの直列方向とレグ間のそれぞれに存在する寄生インダクタンスを考慮した等価回路解析により、レグ間に電流アンバランスが起こることを示す。300 V, 4.6 A の三相インバータを設計・製作し、レグ間の寄生インダクタンスの値により、スイッチング周波数と共振周波数が近づくと最大 3.0 倍の電流アンバランスが起こることを実験により検証した。

第 5 章は、電流リプル増加につながる共振とレグ間電流アンバランスの対策手法を提案する。まず、レグ間バスバーに抵抗率の大きいグラファイトを用いてその寄生抵抗により共振を抑制する手法を提案する。次に、バスバーの 3 つのレグ間のインピーダンスが均等になるように直流側をデルタ結線する手法を提案する。これら 2 つの手法について、300 V, 4.6 A の三相インバータを設計・製作し、提案手法の妥当性を検証した。さらに、バスバーの絶縁材として高誘電体であるチタン酸バリウムを用いることで、キャパシタとレグ間バスバーを一体化した構造を提案する。この構造は、直流側回路の共振が起こらないようにしながら装置全体を小形化することが可能となる。300 V, 4.1 A の単相フルブリッジインバータを設計・製作し、提案手法の妥当性を検証した。

第 6 章は、本研究の成果をまとめ、今後の検討課題について述べる。